Управление, вычислительная техника и информатика

УДК 004.032.26:612.825

ОДНОРОДНАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ С УСЛОВНО-РЕФЛЕКТОРНЫМ МЕХАНИЗМОМ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХПОРОГОВЫХ РАВНОВЕСНЫХ НЕЙРОПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.М. Терешков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: tam@ie.tusur.ru

Предложена двухпороговая равновесная модель нейрона для использования в многослойной нейронной сети прямого распространения. Описан условно-рефлекторный механизм ее обучения.

Введение

При разработке и исследовании различных интеллектуальных устройств и систем зачастую не уделяется достаточного внимания механизмам управления и обучения в живой природе, важнейшими элементами которых являются рефлексы. Поскольку нервные системы подавляющего большинства живых организмов представляют собой сложно организованные нейронные сети, то моделирование и исследование условно-рефлекторного механизма обучения на основе нейронных сетей является весьма актуальным. Большое значение здесь имеют принципы построения не только модели нейронной сети, но и модели нейронов, образующих нейронную сеть.

1. Модель нейрона

Как известно, искусственный нейрон имитирует свойства биологических нейронов [1, 2], являющихся строительными элементами мозга. Большинство существующих на сегодняшний день концепций построения искусственных нейронных сетей используют модель искусственного нейрона [3], обучение которой основано на изменении весовых коэффициентов w_i [4, 5].

Модифицируем классическую модель нейрона следующим образом. Предположим, что все связи имеют единичные веса, и суммарное входное возбуждение определяется как алгебраическая сумма значений соответствующих входных сигналов. Введем также порог торможения нейрона P_t. Линейная активизационная функция для равновесной двухпороговой модели нейрона представлена на рис. 1.

Величины порогов возбуждения P_v и торможения P_t будут определять диапазон значений алгебраической суммы входных сигналов – диапазон активизации, при котором на выходе нейрона формируется уровень возбуждения, отличный от нуля.

Использование единичных связей, а также порогов возбуждения P_v и торможения P_t в качестве параметров, корректируемых в процессе обучения многослойной нейронной сети прямого распространения (МНСПР), позволяет уйти от необходимости настройки каждого весового коэффициента в отдельности, упростить алгоритм обучения.

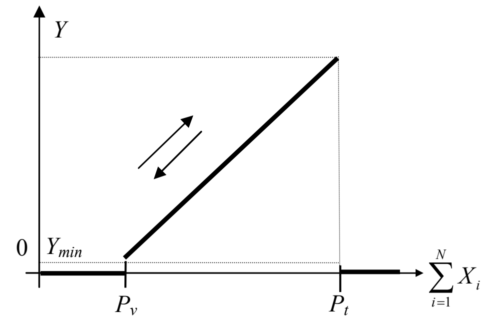


Рис. 1. *Линейная активизационная функция для равновесной двухпороговой модели нейрона; P_v – порог возбуждения нейрона, P_t – порог торможения нейрона, Y_{min} – минимальное выходное возбуждение Y*

Модифицированная модель нейрона описывается выражением:

$$Y = \begin{cases} k_n\left(\sum_{i=1}^{N} X_i - P_v\right) + Y_{\min} & \text{при} \quad \sum_{i=1}^{N} X_i \in [P_v; P_t); \\ 0 & \text{при} \quad \sum_{i=1}^{N} X_i \notin [P_v; P_t). \end{cases} \quad (1)$$

2. Модель нейронной сети

Важной задачей, решаемой при построении МНСПР, в которых нейроны каждого слоя не связаны между собой, является формирование структуры связей нейронов между соседними слоями. Выходной сигнал с каждого нейрона предыдущего слоя поступает, как правило, на входы всех нейронов следующего слоя. Обратные связи между нейронными слоями отсутствуют [6, 7].

Рассмотрим МНСПР, в которой нейроны предыдущего слоя связаны не со всеми нейронами следующего слоя, а только с теми, которые расположены в пределах радиуса возбуждения соответствующего нейрона. Будем считать **радиусом возбуждения** *R* данного нейрона количество боковых связей, расположенных слева или справа от центральной связи, а сами связи – **локальными**. Поясним сказанное с помощью рис. 2.

В общем случае, независимо от радиуса возбуждения, количество боковых связей может быть меньше *R,* а центральная связь – отсутствовать. Поскольку в рассматриваемой нейронной сети возбуждение распространяется по слоям нейронов от предыдущего к последующему слою, то передача возбуждения между соседними слоями может быть описана выражением (2), следующим из (1).

$$Y_{i+1,j}=\begin{cases} k_n\left(\sum\limits_{s=j-R}^{s=j+R} X_{i,s} - P_{v\,i+1,j}\right)+Y_{\min} \\ \quad \text{при} \quad \sum\limits_{s=j-R}^{s=j+R} X_{i,s} \in [P_{v\,i+1,j};P_{t\,i+1,j}); \\ 0 \\ \quad \text{при} \quad \sum\limits_{s=j-R}^{s=j+R} X_{i,s} \notin [P_{v\,i+1,j};P_{t\,i+1,j}). \end{cases} \quad (2)$$

где i – номер нейронного слоя, j – номер нейрона в слое, s – номер нейрона в предыдущем слое i, связанного с j-ым нейроном последующего i+1-ого слоя, $Y_{i+1,j}$ – возбуждение нейрона последующего слоя i+1, $Y_{i,s}$ – возбуждение нейрона предыдущего слоя i, связанного с j-ым нейроном последующего i+1-ого слоя.

На рис. 3 приведены примеры фрагментов картин возбуждения МНСПР, рассчитанные в соответствии с (2) для вариантов задания структуры локальных связей. Возбужденные нейроны более светлые, невозбужденные более темные.

3. Условно-рефлекторный механизм обучения нейронной сети

Рассмотрим условно-рефлекторный механизм обучения [8] сети, в которой используется двухпо-

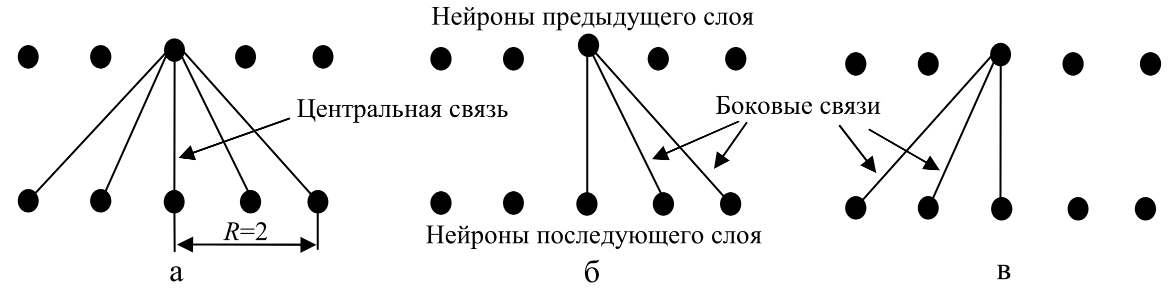


Рис. 2. *Структура локальных связей МНСПР: а) симметричные связи, б) левая асимметрия, в) правая асимметрия*

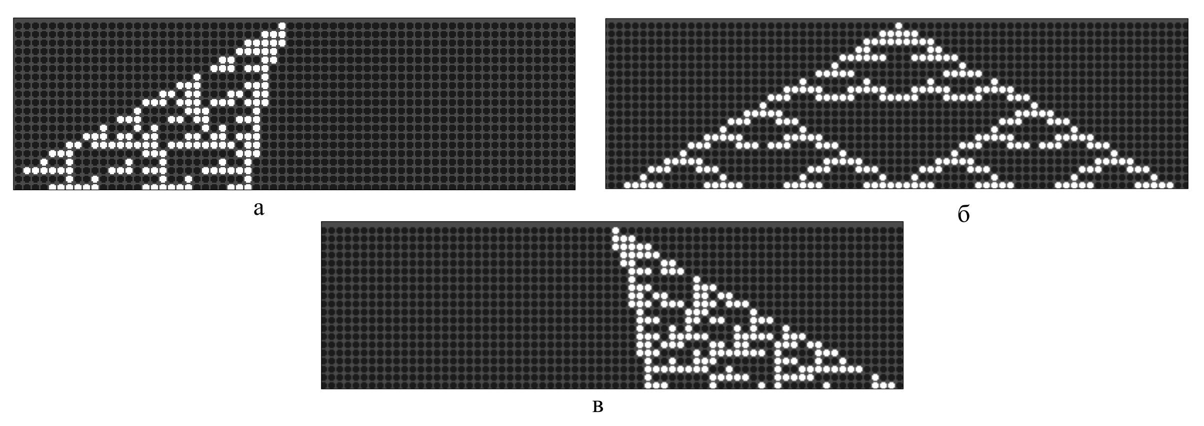


Рис. 3. *Фрагменты картин возбуждения МНСПР для вариантов задания локальных связей: а) правая асимметрия, б) симметричные связи, в) левая асимметрия*

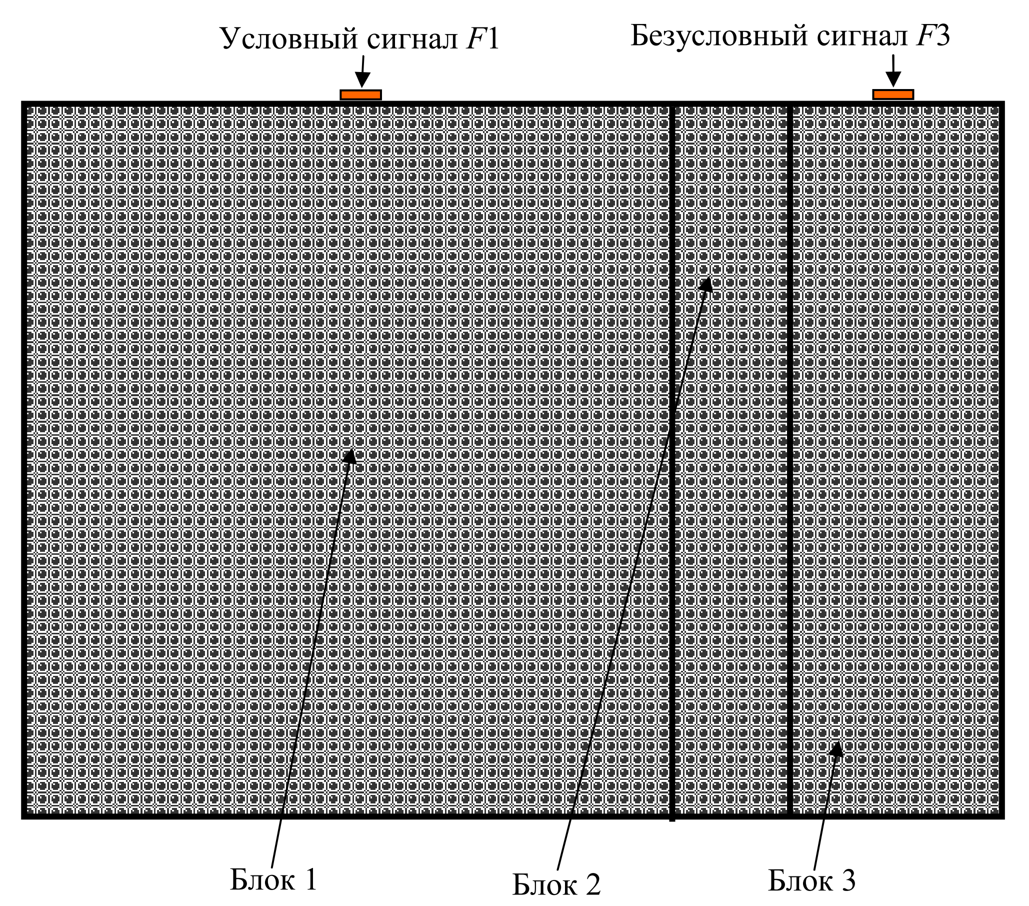


Рис. 4. *Функциональное разделение нейронной сети*

роговая равновесная модель нейрона. Положим, что в нашем случае активизационная функция и количество связей одинаковы для всех нейронов, поэтому МНСПР будем считать **однородной**.

Реализация условно-рефлекторного механизма обучения МНСПР возможно с использованием варианта, предполагающего разделение этой сети на функциональные блоки (рис. 4).

Назовем **функциональным блоком** ограниченную область нейронной сети, характеризующуюся определенным сценарием обучения соответствующих нейронов, а также определенными начальными значениями порогов возбуждения P_v и торможения P_t. Таким образом, в простейшем случае, рассматриваемая МНСПР должна быть разделена на три блока, выполняющих определенные функции.

Простейший вариант условно-рефлекторного обучения возможно реализовать с использованием двух обучающих сигналов (условный *F*1 и безусловный *F*3), подаваемых на разных участках верхнего слоя МНСПР.

Блок 1 предназначен для распространения условного сигнала *F*1. Блок 2 (промежуточный или защитный) используется как область пространствено-временного взаимодействия возбуждений от условного *F*1 и безусловного *F*3 сигналов. В этом блоке происходит образование условно-рефлекторного «нервного пути» из Блока 1 в Блок 3 (выходной) в процессе обучения. Формирование этого «нервного пути» является **основным критерием** обучения нейронной сети. Возбуждение, распространяющееся в Блоке 3, является аналогом «нервного тока», запускающего какую-либо безусловно-рефлекторную реакцию.

Положим, что для распространения условного возбуждения от сигнала *F*1 потенциально открыто все имеющееся пространство МНСПР. В то время как безусловное возбуждение *F*3 не влияет на параметры нейронов Блока 1. Оно лишь «подготавливает почву» для преодоления условным возбуждением изначально более высоких порогов нейронов Блока 2.

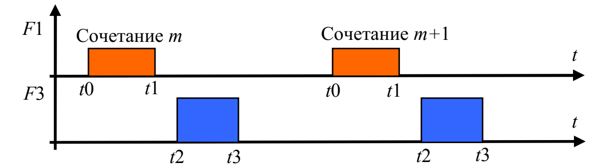


Рис. 5. *Временные диаграммы следования обучающих сигналов; длительность сигналов и пауз между ними: T_{F1} – условный сигнал [t0;t1], T_{F3} – безусловный сигнал [t2; t3], $T_п$ – пауза между условным и безусловным сигналом (t1; t2), $T_{пс}$ – пауза между сочетаниями условного и безусловного сигналов (t3; t0)*

Определим в качестве **единичного дискретного временного интервала (такта)** время прохождения возбуждения через все слои МНСПР от входного слоя к выходному. Зададим сигнал *F*3 более сильным, чем *F*1

и будем подавать его на n тактов позже $F1$, т. к. наилучшими условиями в образовании условного рефлекса является предшествование более слабого условного сигнала $F1$ более сильному безусловному $F3$ [8]. Временные диаграммы следования обучающих сигналов $F1$ и $F3$ приведены на рис. 5.

Назовем **полным циклом обучения** МНСПР интервал времени, содержащий n тактов обучения, включающий обучающее сочетание сигналов $F1$ и $F3$, а также паузу $T_{пс}$ до следующего обучающего сочетания.

Формирование условного рефлекса будем фиксировать на некотором такте обучения МНСПР, когда после неоднократного временного сочетания условного $F1$ и безусловного $F3$ сигналов, возбуждение от условного сигнала из Блока 1 через Блок 2 проходит в Блок 3, вызывая возбуждение нейронов выходного слоя Блока 3 (формируется соответствующий «нервный путь»). Достижение этого результата будет зависеть от подбора начальных значений параметров МНСПР.

Затруднительно точно определить диапазоны значений порогов нейронов функциональных блоков, при которых возможно формирование условного рефлекса. Схематично одно из возможных

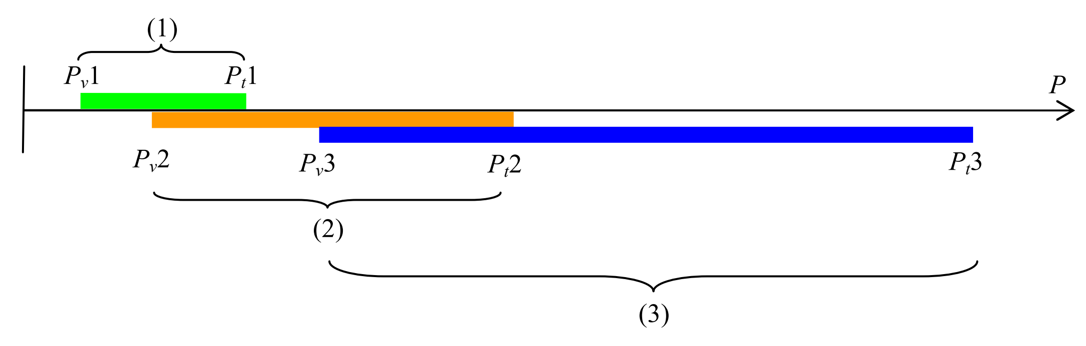


Рис. 6. *Ориентировочные соотношения значений порогов возбуждения P_{v0} и торможения P_{t0} нейронов Блока 1 (1), Блока 2 (2) и Блока 3 (3); значения порогов даны в относительных единицах*

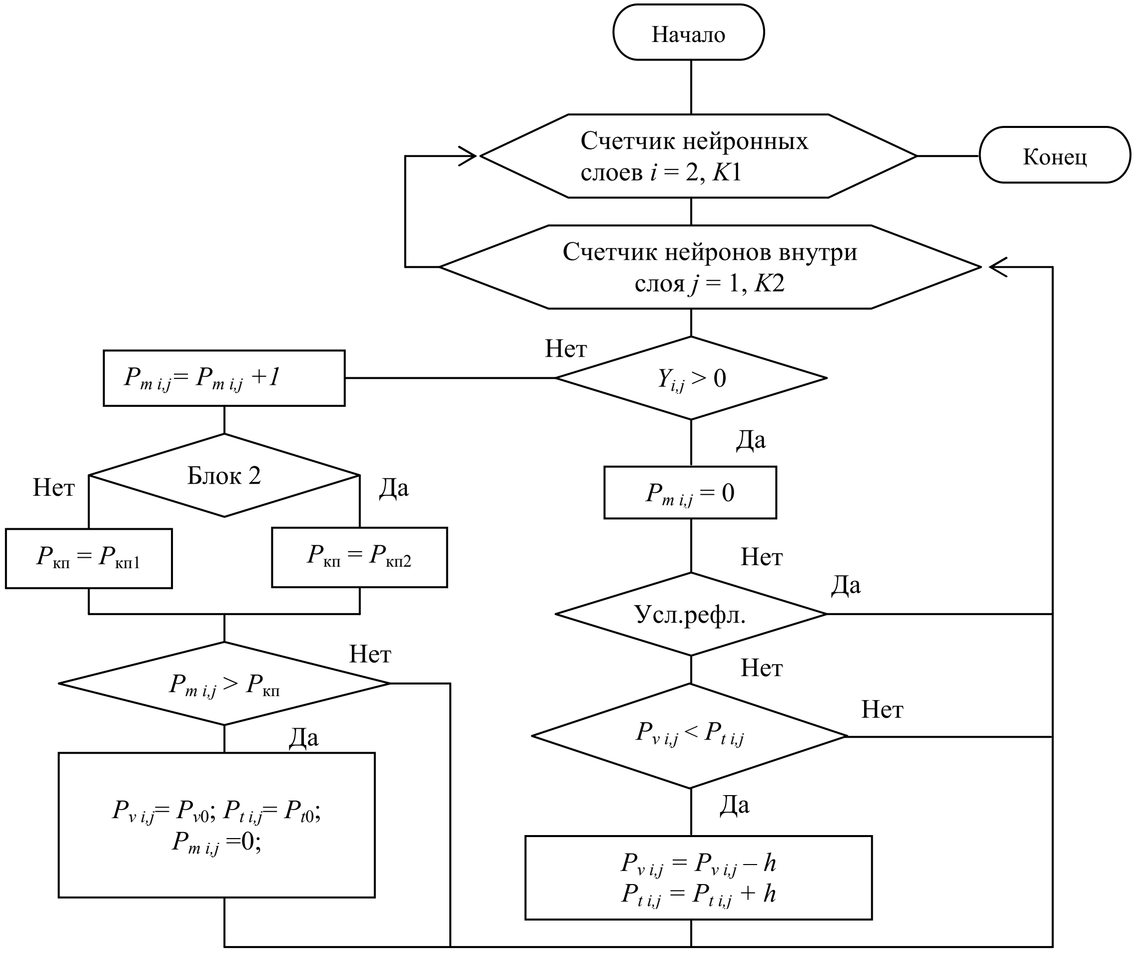


Рис. 7. *Блок-схема алгоритма обучения МНСПР*

ориентировочных соотношений их значений приведено на рис. 6.

Определим значения порогов нейронов Блока 3 фиксированными, а Блока 1 и Блока 2 – варьируемыми, т. е. изменяющимися в процессе обучения.

Установим следующий **критерий изменения порогов нейронов** Блока 1 и Блока 2. На каждом дискретном такте в процессе обучения нейронной сети пороги возбуждения P_v и торможения P_t должны быть изменены в том случае, если соответствующие нейроны находились в возбужденном состоянии ($Y_{i,j}$>0). Величину изменения значений порогов возбуждения и торможения нейронов на каждом такте назовем **шагом** h их изменения.

В рассматриваемой МНСПР реализована функция кратковременной памяти. Для этого введен счетчик идущих подряд невозбужденных состояний нейронов $P_{m\,i,j}$.

Положим, что на протяжении определенного числа идущих подряд тактов обучения нейронной сети какие-либо нейроны находились в невозбужденном состоянии. При этом изменения порогов соответствующих нейронов, произошедшие при обучении, забываются, т. е. пороги принимают первоначальные значения. Условие забывания нейронами изменений своих порогов, накопленных в процессе обучения, будет иметь вид:

$$P_{mi,j} > P_{\text{кп}},$$

где $P_{\text{кп}}$ **– порог кратковременной памяти.**

Блок-схема алгоритма одного такта обучения МНСПР приведена на рис. 7.

При обучении формируется временная ассоциативная связь между условным F1 и безусловным F3 сигналом (условно-рефлекторный «канал» из Блока 1 в Блок 3) в результате пересечения диапазонов активации соответствующих нейронов функциональных блоков. Обученная нейронная сеть будет реагировать на сигнал F1 возбуждением нейронов Блока 3. Значения сигналов F1 и F3 определяются как константы целого типа на выходах конечного числа нейронов первого слоя.

Данный алгоритм обучения может быть применен для распознавания повторяющейся символьной комбинации, заданной как условный сигнал F1, связанный во времени с основным (безусловным) сигналом F3. Различные символьные комбинации могут быть заданы на различных участках первого слоя нейронной сети. При этом в процессе обучения нейронной сети определяется количество сочетаний F1 и F3, требуемое для распознавания ассоциации F1 и F3. Необходимое количество сочетаний возможно получить путем перебора начальных значений варьируемых параметров – порогов нейронов Блока 2 в некотором выбранном диапазоне.

Рассмотренный алгоритм обучения можно классифицировать как алгоритм самообучения без учителя, не требующий больших вычислительных затрат. Желаемый выход формируется по жестко определенному сценарию изменения порогов нейронов, в зависимости от соотношения их начальных значений в различных функциональных блоках нейронной сети, порога кратковременной памяти и временных соотношений обучающих сочетаний F1 и F3.

4. Экспериментальное исследование алгоритма обучения

Моделирование и экспериментальное исследование условно-рефлекторного обучения МНСПР, использующей двухпороговую равновесную модель нейрона, в среде программирования Delphi показало, что наилучшим сценарием изменения порогов нейронов является увеличение диапазона их активации при уменьшении порогов возбуждения P_v и увеличении порогов торможения P_t.

Рассмотрим пример распознавания некоторой символьной комбинации F1, ассоциированной во времени с сигналом F3. Варьируемыми параметрами при обучении являются пороги возбуждения P_v (уменьшаются) и торможения P_t (увеличиваются) нейронов Блока 1 и Блока 2. Постоянные параметры нейронной сети (в том числе параметры распознаваемой комбинации F1 и сигнала F3) приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Постоянные параметры нейронной сети*

Параметр	Значение
Количество:	
•нейронных слоев	220
•нейронов в слое	245
•нейронов в каждом слое Блока 2	35
Пороги возбуждения нейронов:	
•Блока 1 (начальные значения)	4
•Блока 2 (начальные значения)	20
•Блока 3	20
Пороги торможения нейронов:	
•Блока 1 (начальные значения)	15
•Блока 2 (начальные значения)	80
•Блока 3	200
Число связей:	
•боковых (левая асимметрия) для нейронов Блока 1	2
•прямых (симметрия) для нейронов Блока 2 и Блока 3	5
Число возбужденных нейронов первого слоя (символьная комбинация F1)	7
Номер первого возбужденного нейрона в комбинации F1	88
Номер последнего возбужденного нейрона в комбинации F1	94
Возбуждение нейронов первого слоя (символьная комбинация F1)	5
Число возбужденных нейронов первого слоя (сигнал F3)	6
Номер первого возбужденного нейрона от сигнала F3	228
Номер последнего возбужденного нейрона от сигнала F3	234
Возбуждение нейронов первого слоя (сигнал F3)	25
Шаг изменения порогов возбуждения и торможения	1
Порог кратковременной памяти (количество тактов)	12
Длительность:	
•воздействия комбинации F1 (количество тактов)	4
•воздействия сигнала F3 (количество тактов)	7
•паузы между сигналами F1 и F3 (количество тактов)	1
•паузы между сочетаниями F1 и F3 (количество тактов)	5
•одного обучающего цикла (количество тактов)	17

В данном примере было проведено девять независимых друг от друга обучающих серий для различных начальных значений порогов торможения P_{t02} нейронов Блока 2. В результате обучения были получены соответствующие значения числа сочетаний $F1$ и $F3$, требующихся для распознавания данной ассоциации. Результаты обучения приведены в табл. 2.

Таблица. 2. *Результаты обучения нейронной сети*

Число сочетаний	3	5	6	8	9	14	26	47	75
P_{t02}	80	75	70	65	60	55	50	45	40

Приведенный пример является одним из возможных применений условно-рефлектоного обучения. Кроме того, при исследовании представленного алгоритма, возможно рассмотрение обучающих серий для различных значений порога кратковременной памяти – $P_{кп}$, а также других параметров, приведенных в табл. 1.

Выводы

1. Разработана двухпороговая равновесная модель нейрона для использования в однородной многослойной нейронной сети прямого распространения с локальными связями.
2. Разделение сети на функциональные блоки позволило реализовать в ней условно-рефлекторный механизм обучения.
3. В результате моделирования и экспериментального исследования условно-рефлекторного обучения многослойной нейронной сети прямого распространения, определен наилучший сценарий изменения порогов возбуждения и торможения нейронов.
4. Моделирование и экспериментальное исследование условно-рефлекторного обучения нейронной сети может быть полезно при построении различных технических устройств и систем, в частности для решения задач распознавания повторяющихся символьных комбинаций, ассоциированных во времени с основным сигналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника. – М.: Мир, 1992. – 120 с.
2. Шульговский В.В. Основы нейрофизиологии. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 277 с.
3. Анил К. Введение в искусственные нейронные сети // Открытые системы. – 1997. – № 4. – С. 31–44.
4. Grossberg S. Classical and instrumental learning by neural networks // Progress in theoretical biology. – N.Y.: Academic Press, 1974. – V. 3. – P. 51–141.
5. Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей – М.: СП ПараГраф, 1990. – 159 с.
6. Галушкин А.И. Итоги развития теории многослойных нейронных сетей (1965–1995 г.) в работах научного центра нейрокомпьютеров и ее перспективы // Нейрокомпьютер. – 1996. – № 1, 2. – С. 5-23.
7. Минский М., Пейперт С. Персептроны: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 261 с.
8. Павлов И.П. Объективное изучение высшей нервной деятельности животных. Полн. собр. соч. – Изд. 2. – Т. 3. – Кн. 2. – М.-Л.: АН СССР, 1951. – 433 с.

Поступила 05.06.2006 г.